



TAMPEREEN
AMMATTIKORKEAKOULU

PUUPALKIN JA -PILARIN PALOMITOITUS

Laskentapohja

Joni Koivisto

Opinnäytetyö
Huhtikuu 2016
Rakennustekniikka
Talonrakennustekniikka



TIIVISTELMÄ

Tampereen ammattikorkeakoulu
Rakennustekniikan koulutusohjelma
Talorakennustekniikka

KOIVISTO, JONI:
Puupalkin ja -pilarin palomitoitus
Laskentapohja

Opinnäytetyö 42 sivua
Huhtikuu 2016

Opinnäytetyössä tehtiin laskentapohja puisen palkin ja pilarin mitoittamiseen palotilanteessa. Laskentapohja tehtiin Excel-ohjelmistolla ja se tulee tilaajayrityksen rakennesuunnittelijoiden käyttöön. Laskentapohjasta laadittiin käyttöohje ja laskentaesimerkki. Lisäksi työssä tutkittiin palomitoittamiseen olemassa olevia ohjelmia.

Työn alussa tutustutaan paloasioihin liittyvään lainsäädäntöön ja määräyksiin sekä puun käyttäytymiseen tulipalossa. Määräykset sallivat yhä suurempien puurunkoisten talojen rakentamisen Suomessa. Turvallisuuden vuoksi suurien rakennusten rakenteilta vaaditaan pitkiä palonkestoajakoja. Tästä syystä rakenteille on tehtävä mitoitus palotilanteessa. Mitoittamiseen on olemassa ohjeet, mutta selkeä suunnittelijoiden työtä helpottava työkalu palkin ja pilarin mitoittamiseen puuttui. Työssä käydään läpi myös palomitoituksen kulku, esitetään laskentapohja sekä tehdään valmiilla laskentapohjalla laskentaesimerkki palkille.

Tilaajayrityksen käyttöön saatiin toimiva työkalu puisen palkin ja pilarin mitoittamiseen. Laskentapohjan valittavissa olevat puun jatkojalosteet rakenneosan materiaaliksi sekä levyt rakenneosan suojaamiseksi ovat yleisimpiä käytössä olevia materiaaleja. Laskentapohja ei sovellu liitosten mitoittamiseen. Jatkossa laskentapohjan materiaalivalikkoja voidaan tarpeen tullen laajentaa. Lisäksi laskentapohjan on tarkoitus tulevaisuudessa toimia osana tilaajayrityksen käytössä olevan isomman mitoitusohjelman laajentamista.

ABSTRACT

Tampereen ammattikorkeakoulu
Tampere University of Applied Sciences
Degree Programme in Civil engineering
Option of Structural engineering

KOIVISTO, JONI:

Fire technical dimensioning for timber beam and column
Excel-software

Bachelor's thesis 42 pages

April 2016

The main purpose of this bachelor thesis was to create Excel-software for fire designing of timber beams and columns. The software was made for client company's designers use. This thesis includes instruction report and calculation example of the software. In addition in this thesis was examined the existing programs for structural fire designing.

The thesis begins with information of legislation about fire issues in construction and with information of wood behavior under fire. It is nowadays allowed to build higher buildings with wood. For safety issues the structures of large buildings have to support long times under fire. That is why the structures must be designed for fire situation. There are instructions for structural fire designing but a simple tool or software for quick and easy designing was missing.

The end result was a functional Excel-software of timber fire designing for client company. This version of Excel-software has only the most common materials. In the future this software is possible to develop for different kind of fire protection board types and different kind of wood as a material of beam or column.

Key words: beam, column, wood structures, fire safety, designing

SISÄLLYS

1	JOHDANTO	6
2	PALOTURVALLISUUS JA -LAINSÄÄDÄNTÖ	7
3	PALOLUOKITUKSET	8
3.1	Rakennukset.....	8
3.2	Rakennusosat	9
3.3	Rakennustarvikkeet	11
4	PUU TULIPALOSSA	14
5	PUURAKENTTEEN KANTAVUUDEN PALOMITOITUS.....	15
5.1	Tehollisen poikkileikkauksen menetelmä	19
5.1.1	Hiiltymissyvyys	21
5.2	Palosuojaajat palkit ja pilarit	23
6	PUURAKENTTEIDEN PALOMITOITUSOHJELMAT	27
6.1	Toiminallinen palomitoitus.....	27
6.2	Laskentapohjat palomitoitukseen.....	30
7	LASKENTAPOHJA PUUPALKIN JA -PILARIN PALOMITOITUKSEEN	31
7.1	Lähtötiedot.....	31
7.2	Rasitukset.....	32
7.3	Tulokset	33
7.4	Laskentapohjan käytettävyys.....	34
7.5	Laskentapohjan käyttökohteet	35
7.6	Jatkokehitys	36
8	LASKENTAESIMERKKI.....	37
8.1	Lähtötiedot.....	37
8.2	Rasitukset.....	37
8.3	Tulokset	39
9	POHDINTA	40
	LÄHTEET	41

LYHENTEET JA TERMIT

A1	rakennustarvikkeet, jotka eivät osallistu paloon lainkaan
A2	rakennustarvikkeet, joiden osallistuminen paloon on erittäin rajoitettu
B	rakennustarvikkeet, joiden osallistuminen paloon on hyvin rajoitettu
C	rakennustarvikkeet, jotka osallistuvat paloon rajoitetusti
D	rakennustarvikkeet, joiden osallistuminen paloon on hyväksyttävissä
d	pintamateriaalin palavien pisaroiden tuotto
d_{ef}	tehollinen hiiltemissyvyys
E (tarvikkeissa)	rakennustarvikkeet, joiden käyttäytyminen palossa on hyväksyttävissä
E (luokkavaatimuksissa)	tiiviyys
$E_{d,fi}$	palotilanteen rasitus
F	rakennustarvikkeet, joiden käyttäytymistä palossa ei ole määritelty
I	eristävyys
R	kantavuus
s	pintamateriaalin savuntuotto
t_{ch}	hiiltymisen alkamishetki
t_f	palosuojauksen murtumishetki

Osa lyhenteistä ja termeistä on esitetty tekstissä niiden asiayhteydessä.

1 JOHDANTO

Suomessa paloturvallisuutta rakentamisessa ja rakennusten suunnittelussa ohjaa Maankäyttö- ja rakennuslaki (132/1999) ja pelastuslaki (379/2011) sekä Suomen rakentamismääräyskokoelman osa E. Määräykset sallivat yhä suurempien puurunkoisten talojen rakentamisen Suomessa, mutta samalla vaativat rakenteilta pitkiä palonkestoajkoja turvallisuuden takaamiseksi. Tästä syystä rakenteet on mitoitettava palotilanteessa.

Opinnäytetyössä tehdään Excel-pohjainen laskentatyökalu puisen palkin ja pilarin mitoittamiseksi palotilanteessa. Laskenta tehdään Eurokoodi 5 antamien ohjeiden mukaan. Laskennassa tarkastetaan palkin käyttöasteet nurjahdukselle ja taivutukselle sekä pilarin käyttöasteet puristukselle, nurjahdukselle ja kiepahdukselle. Opinnäytetyössä keskitytään pääasiassa puurakenteiden kantavuuteen palossa. Opinnäytetyössä ei käsitellä aktiivista palosuojausta, eikä puututa rakenteiden liitosten mitoittamiseen. Työssä tutkitaan myös palomitoittukseen olemassa olevia ohjelmia ja laskentapohjia.

Laskentapohja tehtiin tilaajayrityksen Sweco Rakennetekniikka Oy:n puurakenneosaston rakennesuunnittelijoiden käyttöön. Laskentapohjan tarkoitus on nopeuttaa rakenteiden mitoittamista palotilanteessa. Laskentapohjasta pyrittiin tekemään mahdollisimman selkeä ja helppokäyttöinen, jotta sen käyttö olisi nopeaa. Yrityksessä työskentelevät rakennesuunnittelijat ehdottivat palomitoitustyökalua opinnäytetyön aiheeksi osastopalaverissa syksyllä 2015. Sweco Rakennetekniikan yhteyshenkilönä toimi puurakenneosaston osastopäällikkö Heikki Löytty. Opinnäytetyön ohjaajana yrityksen puolesta toimi DI Juha Kukkonen ja ohjaavana opettajana Lehtori Heikki Saarenpää.

2 PALOTURVALLISUUS JA -LAINSÄÄDÄNTÖ

Suomen Maankäyttö- ja rakennuslaki (132/1999) määrää, että tulipalossa rakennuksen kantavien rakenteiden on kestävä sortumatta vähimmäisaika, jotta rakennuksesta ehditään poistumaan, pelastamaan sinne jääneet ja saamaan palo hallintaan. Lisäksi palon leviäminen rakennuksessa pitää rajata. Palo ei myöskään saa leviätä ympärillä oleviin rakennuksiin.

Tarkemmin rakentamisen paloturvallisuutta ohjaa Suomen Rakentamismääräyskokoelman E-osa. Edellä mainitut paloturvallisuusvaatimukset katsotaan täytyneeksi, kun rakennus suunnitellaan ja rakennetaan noudattamalla Rakentamismääräyskokoelman E-osan ohjeiden paloluokkia ja lukuja (Suomen Rakentamismääräyskokoelma E1, 8).

Ennen vuotta 1997 Suomessa sai rakentaa korkeintaan kaksikerroksisen puurunkoisen asuinrakennuksen. Vuonna 1997 Suomen Rakentamismääräyskokoelman osaa E1 muutettiin siten, että puurunkoinen tai puujulkisivuinen rakennus sai olla maksimissaan 4-kerroksinen. Vuonna 2011 määräyksiä muutettiin jälleen puurakentamista suosivammaksi niin, että tällä hetkellä on mahdollista rakentaa 8-kerroksinen asuin- tai työpaikkarakennus puusta. (Puuinfo. Puurakentamisen asema ja mahdollisuudet Suomessa.)

Rakenteiden palomitoitus on määräyksien muuttumisen myötä yleistynyt. Kun rakennus saa olla suurempi kuin ennen, niin siellä mahtuu asumaan tai työskentelemään enemmän ihmisiä. Tämän takia rakennuksen paloluokitus on tiukempi, eli siltä vaaditaan parempaa palonkestoa. Paloluokituksen tiukentuessa kasvaa myös aika, joka kantavien rakenteiden tulee säilyä sortumatta palossa.

3 PALOLUOKITUKSET

3.1 Rakennukset

Rakennukset jaetaan Rakentamismääräyskokoelman mukaan paloluokkiin P1, P2 ja P3 niiden koosta ja henkilömäärästä riippuen. Paloluokan P1 rakennusten kantavien rakenteiden oletetaan kestävän palossa sortumatta. Niiden kokoa ja henkilömäärää ei ole rajoitettu. (Suomen Rakentamismääräyskokoelma E1, 10.)

P2 luokan rakennusten paloturvallisuusvaatimukset ovat matalammat kuin luokassa P1. Luokassa P2 rakennuksen kokoa ja henkilömäärää on rajoitettu ja pintamateriaaleille sekä paloturvallisuutta parantaville laitteille, esimerkiksi automaattiselle ammusjärjestelmälle on asetettu vaatimuksia riittävän turvallisuuden saavuttamiseksi. (Suomen Rakentamismääräyskokoelma E1, 10.)

Paloluokan P3 rakennuksien kantaville rakenteille ei ole asetettu erityisiä vaatimuksia. Riittävä turvallisuustaso saavutetaan rajaamalla rakennuksen kokoa ja henkilömäärää. Taulukossa 1 on esitetty rakennusten kokoa koskevat rajoitukset ja taulukossa 2 rakennusten henkilömäärää koskevat rajoitukset. (Suomen Rakentamismääräyskokoelma E1, 10.)

TAULUKKO 1. Rakennuksen kokoa koskevat rajoitukset (Suomen Rakentamismääräyskokoelma, 11.)

TAULUKKO 3.2.1	RAKENNUKSEN KOKOA KOSKEVAT RAJOITUKSET		
Rakennuksen ominaisuus	Rakennuksen paloluokka		
	P1	P2	P3
KERROSLUKU			
- yleensä	ei rajoitusta	enintään 2	enintään 2
- asuinrakennus, työpaikkarakennus	ei rajoitusta	enintään 8	enintään 2
- tuotanto- tai varastorakennus, autosuoja	ei rajoitusta	enintään 2	enintään 1
KORKEUS			
- yleensä	ei rajoitusta	enintään 9 m	enintään 9 m
- asuinrakennus, työpaikkarakennus 3–4 krs.	ei rajoitusta	enintään 14 m	ei sallittu
- asuinrakennus, työpaikkarakennus 5–8 krs.	ei rajoitusta	enintään 26 m	ei sallittu
- yksikerroksinen tuotanto- tai varastorakennus	ei rajoitusta	ei rajoitusta	enintään 14 m
KERROSALA			
Kerrosala yleensä			
- yksikerroksinen	ei rajoitusta	ei rajoitusta	enintään 2400 m ²
- kaksikerroksinen	ei rajoitusta	ei rajoitusta	enintään 1600 m ²
- yli kaksikerroksinen	ei rajoitusta	enintään 12 000 m ²	ei sallittu
Kerrosala tuotanto- ja varastorakennuksissa sekä autosuojissa			
- yksikerroksinen	ei rajoitusta	ei rajoitusta	ei rajoitusta
- kaksikerroksinen	ei rajoitusta	ei rajoitusta	ei sallittu
Selostus	Rakennuksen korkeus on julkisivupinnan ja vesikaton leikkausviivan korkeus maan pinnasta (MRA 58 §). Tarvittaessa lasketaan rakennuksen nurkkapisteen korkeuksien keskiarvo.		

TAULUKKO 2. Henkilömäärää koskevat rajoitukset (Suomen Rakentamismääräyskoelma, 12.)

TAULUKKO 3.2.2		RAKENNUKSEN SUURIN SALLITTU HENKILÖMÄÄRÄ		
Käyttötapa	Kerroksia	Rakennuksen paloluokka		
		P1	P2	P3
Asunnot		ei rajoitusta	ei rajoitusta	ei rajoitusta
Majoitustilat	1	ei rajoitusta	paikkaluku 150	paikkaluku 50
	2	ei rajoitusta	paikkaluku 50	paikkaluku 10
Hoitolaitokset	1	ei rajoitusta	paikkaluku 100	paikkaluku 10
	2	ei rajoitusta	paikkaluku 25	<i>ei sallittu</i>
Kokoontumis- ja liiketilat	1	ei rajoitusta	ei rajoitusta	henkilöitä 500
	2	ei rajoitusta	henkilöitä 250	henkilöitä 50
Työpaikatilat	1	ei rajoitusta	ei rajoitusta	ei rajoitusta
	2	ei rajoitusta	ei rajoitusta	työntekijöitä 150
Tuotanto- ja varastotilat	1	ei rajoitusta	ei rajoitusta	ei rajoitusta
	2	ei rajoitusta	työntekijöitä 50	<i>ei sallittu</i>

Ohje	<p>Milloin yli kaksikerroksisia rakennuksia saa taulukon 3.2.1 mukaan rakentaa, niissä ei ole henkilömäärärajoituksia.</p> <p>Kaksikerroksisen rakennuksen henkilömäärärajoitukset koskevat tapauksia, joissa mainitun käyttötavan mukaiset tilat on sijoitettu kokonaan tai osaksi rakennuksen toiseen kerrokseen. Jos näitä tiloja on vain ensimmäisessä kerroksessa, voidaan soveltaa yksikerroksista rakennusta koskevia rajoituksia.</p> <p>Mikäli rakennuksessa on eri käyttötaparyhmiin kuuluvia tiloja, rakennuksen turvallisuustaso arvioidaan tarkastelemalla rakennusta kokonaisuutena.</p>
------	--

3.2 Rakennusosat

Rakennusosien luokkavaatimukset ovat kantavuus R, tiiveys E ja eristävyys I. Rakennusosien luokkavaatimus ilmaisee sen ajan, joka rakenteen tulee pysyä palossa kantavana tai osastoivana. Palonkestoaika ilmoitetaan minuutteina luokkavaatimuksessa. Esimerkiksi rakenneosia, jonka luokkavaatimus on R60, kestää palossa kantavana vähintään 60 minuuttia.

Kantavat rakenteet suunnitellaan kestäväksi taulukon 3 mukaiset vähimmäisajat rakennukset koosta, käyttötavasta, paloluokasta ja palokuormasta riippuen. Osastoivat rakennusosat suunnitellaan taulukon 4 mukaisille vaatimuksille.

TAULUKKO 3. Kantavien rakenteiden luokkavaatimukset (Suomen rakentamismääräyskokoelma, 16.)

TAULUKKO 6.2.1		KANTAVIEN RAKENTEIDEN LUOKKAVAATIMUKSET						
		Rakennuksen paloluokka						
		P1			P2			P3
		Palokuorma MJ/m ²			Palokuorma MJ/m ²			
		yli 1200	600–1200	alle 600	yli 1200	600–1200	alle 600	
Sarake		1	2	3	4	5	6	7
Enintään 2-kerroksinen rakennus yleensä		R 120 *	R 90 *	R 60 *	R 30	R 30	R 30	-
- jos rakennuksen eristeet eivät ole vähintään luokkaa A2-s1, d0		R 120	R 90	R 60	R 30	R 30	R 30	-
- hoitolaitokset, majoitustilat, kellarit		R 120	R 90	R 60	R 30	R 30	R 30	-
3–8-kerroksinen rakennus yleensä		R 180	R 120	R 60	ei mahd.	ei mahd.	ei mahd.	ei mahd.
3–8-kerroksinen asuin- tai työpaikkarakennus								
- kerrokset		R 180	R 120	R 60	R 180 *	R 120 *	R 60 *	ei mahd.
- kellarikerrokset		R 180	R 120	R 60	R 180	R 120	R 60	ei mahd.
Yli 8-kerroksinen rakennus		R 240	R 180	R 120	ei mahd.	ei mahd.	ei mahd.	ei mahd.
Ylimmän maanalaisen kellarikerroksen alapuolella sijaitsevat kellarikerrokset		R 240	R 180	R 120	R 240	R 180	R 120	R 60

TAULUKKO 4. Osastoivien rakennusosien luokkavaatimukset (Suomen rakentamismääräyskokoelma, 18.)

TAULUKKO 7.2.1		OSASTOIVIEN RAKENNUSOSIEN LUOKKAVAATIMUKSET				
		Rakennuksen paloluokka ja kerrosluku				
		P1 ja P2 3–8 kerrosta			P2 1–2 kerrosta	P3
		Palokuorma MJ/m ²				
		yli 1200	600–1200	alle 600		
Sarake		1	2	3	4	5
Osastoivat rakennusosat kerroksissa		EI 120	EI 90	EI 60	EI 30	EI 30
Osastoivat rakennusosat kellareissa		EI 120	EI 90	EI 60	EI 60	EI 30
Taulukon huomautus:		Tuotanto- ja varastorakennuksen pinta-alaosastointia toteuttavien rakennusosien luokkavaatimukset Suomen rakentamismääräyskokoelman ohjeiden E2 mukaan, autosuojan ohjeiden E4 mukaan ja kattilahuoneen sekä polttoainevaraston osastoivien rakennusosien luokkavaatimukset ohjeiden E9 mukaan.				

Vuonna 2014 Jyväskylään valmistui Suomen ensimmäinen kahdeksan kerroksinen puu-kerrostalo Puukuokka (Kuva 1). Taulukosta 1 ja 2 nähdään, että kyseinen rakennus kuuluu paloluokkaan P2. Taulukosta 3 nähdään, että palokuorman ollessa alle 600 MJ/m² kantavien rakenteiden luokkavaatimus kyseisessä rakennuksessa on R60. Taulukossa 4 on osastoivien rakenneosien luokkavaatimukset, jotka tälle rakennukselle määrää luokan EI60.



KUVA 1. Jyväskylän Puukuokka. (Woodarchitecture. 2016)

3.3 Rakennustarvikkeet

Palon kehittymistä voidaan rajoittaa erilaisilla pintamateriaaleina käytettävillä rakennustarvikkeilla. Toisaalta ne voivat myös edistää palon kehittymistä. Rakennustarvikkeiden palotekniset ominaisuudet huomioidaan luokittelemalla ne sen mukaan, kuinka ne osallistuvat paloon, kuinka ne vapauttavat lämpöä ja syntykö niistä savua tai palavia pisaroita (Suomen rakentamismääräyskokoelma, 20). Suomen rakentamismääräyskokoelman osassa E1 esitetään rakennuksen eri pintojen materiaalien luokkavaatimukset.

Rakennustarvikkeet jaetaan luokkiin A1, A2, B, C, D, E ja F, sen mukaan kuinka ne osallistuvat paloon. Luokan A1 rakennustarvike ei osallistu paloon lainkaan, kun taas luokassa F ovat materiaalit, joiden osallistumista paloon ei ole määritetty. (Gyproc, paloluokitusjärjestelmät 2011.)

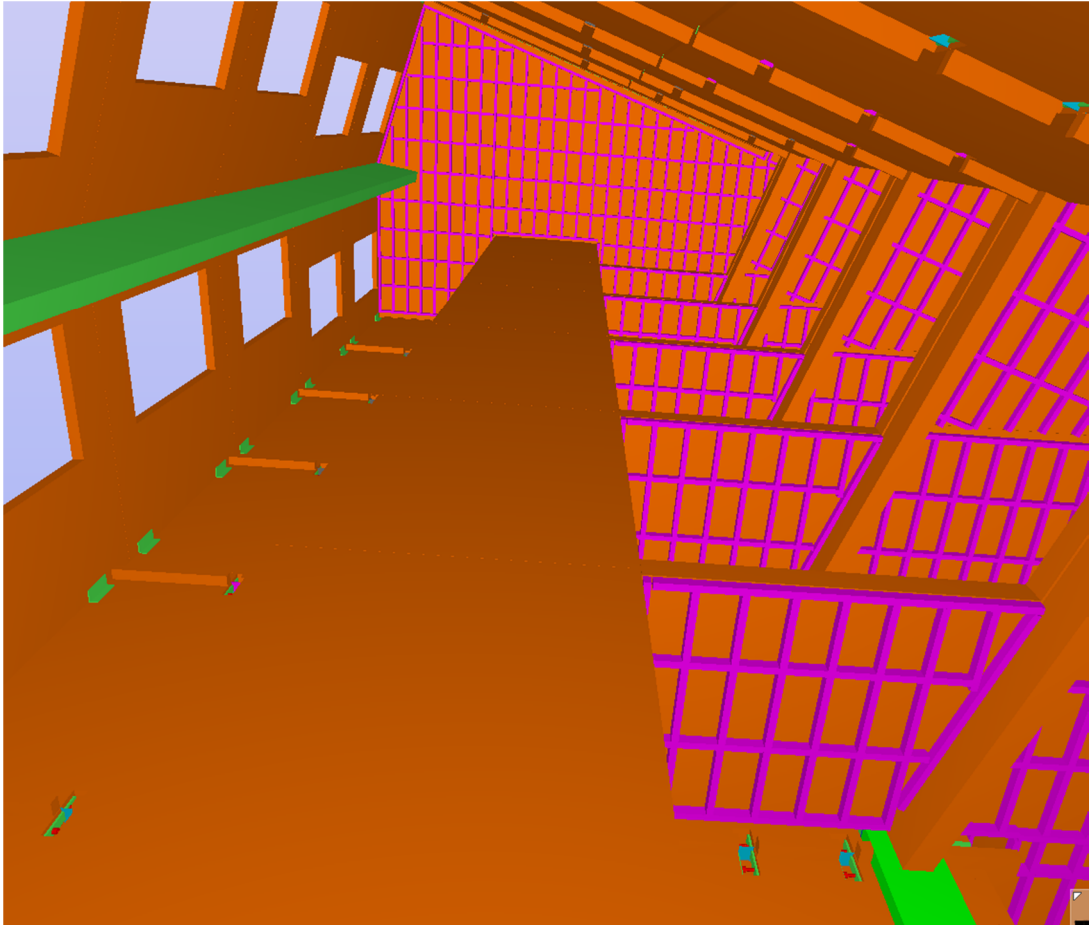
Rakennusmateriaalien paloluokitusta tarkentavat lisämääreet s1, s2 ja s3, jotka kertovat materiaalin savuntuoton. s1 Tarkoittaa, että savuntuotto on erittäin vähäistä, s2:ssa savuntuotto on vähäistä ja s3:ssa savuntuotto on suurempaa kuin edellisissä. (Gyproc, paloluokitusjärjestelmät 2011.)

Palavien pisaroiden muodostumista kuvaa lisämääreet d0, d1 ja d2. Lisämääreen d0 materiaaleista ei synny palavia pisaroita, d1:ssä niitä syntyy, mutta ne sammuvat nopeasti ja d2:ssa palavien pisaroiden tuotto ei täytä lisämääreiden d0 tai d1 vaatimuksia. (Gyproc, paloluokitusjärjestelmät 2011.)

Kohdassa 3.2 esimerkiksi otettu Jyväskylän Puukuokka on kasattu tilaelementeistä, joiden runko on ristiinliimattua puulevyä (CLT). Puukerrostaloja tehdään Suomessa CLT:n lisäksi pilaripalkkirunkoisena, sekä niin sanottuna hybridirakenteena, joka koostuu liimapuurungosta ja kantavista suurelementeistä. Kuva 2 on Puukuokan rappukäytävästä, jossa vasemmalla näkyy iso liimapuinen pilari. Kyseinen pilari, sekä oikealla näkyvät palkit on suojattu kipsilevyllä. Rakentamismääräyskokoelman mukaan P2-luokan 3-8 kerroksisen talon kantavat rakenteet, jotka eivät ole vähintään A2-s1, d0-luokkaa on suojattava vähintään k₂30, A2-s1, d0-luokan tarvikkeilla. k₂30 Tarkoittaa, että suojaverhouksen on suojattava rakennetta vähintään 30 minuuttia. Suojaukseksi käy esimerkiksi yksi kerros 18mm kuitukipsilevyä. Kuva 3 on samasta rappukäytävästä Puukuokan 3D-mallista. (Lepikonmäki 2016.)



KUVA 2. Puukuokan rappukäytävä. (PUU 3/15. 2015, 14.)



KUVA 3. Puukuokan rappukätävän palosuojattu liimapuupilari.

4 PUU TULIPALOSSA

Puu luokitellaan palavaksi materiaaliksi. Se tarvitsee syttyäkseen happea ja lämpöä. Puun syttymislämpötila on $+250 - 300\text{ }^{\circ}\text{C}$. Syttymiseen vaikuttaa puun kosteus, paksuus, tiheys sekä ympäröivä lämpötila. (Puuinfo: Paloteknisiä ominaisuuksia.)

Palaessa puun pinnalle muodostuu hiilikerros (kuva 4), joka hidastaa lämmön siirtymistä ja palon etenemistä. Näin ollen puu suojaa itse itseään tulipalolta. Puu hiiltyy keskimäärin $0,8\text{ mm/min}$. 15 mm:n päässä hiiltymisrajasta puun lämpötila on enää alle $100\text{ }^{\circ}\text{C}$, joten hiilikerros suojaa puuta lämmöltä. (Puuinfo: Paloteknisiä ominaisuuksia.)

Kun tulipalo on edennyt täysin kehittyneeseen vaiheeseen, on puun hyvistä ominaisuuksista hyötyä rakenteiden säilymisen kannalta. Näitä ominaisuuksia ovat mm. hidas pinnasta etenevä tuhoutuminen, korkea lujuus palotilanteessa ja pienet muodonmuutokset palossa. (Paloturvallinen puutalo 2005, 14)

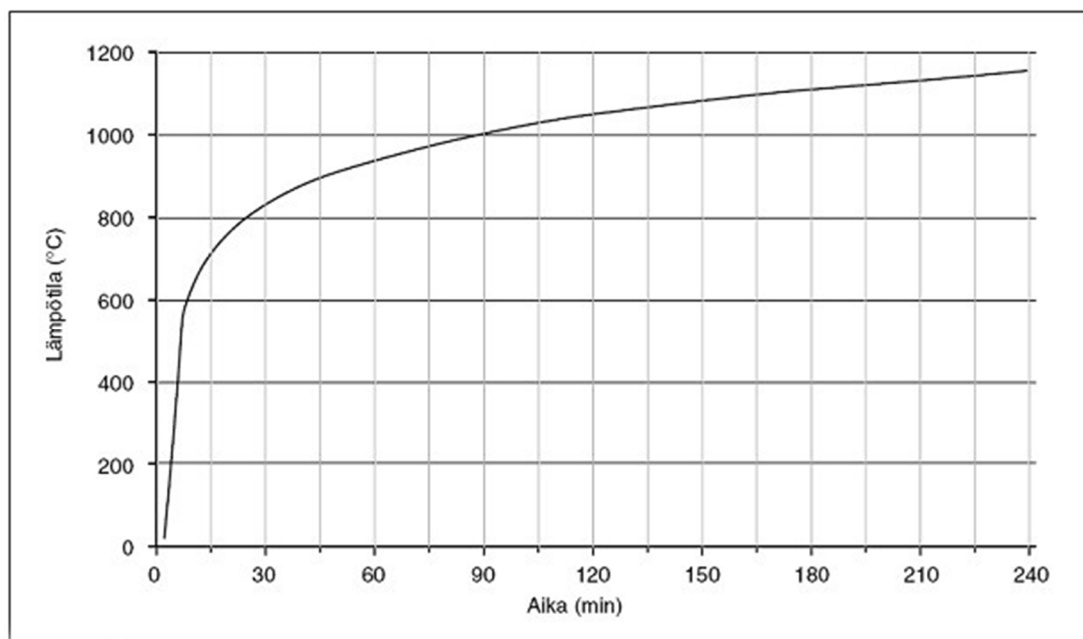


KUVA 4. Puun hiiltyminen tulipalossa. (Fire safety in timber buildings, 13.)

5 PUURAKENTEEN KANTAVUUDEN PALOMITOITUS

Puun palomitoitus tehdään Suomessa standardin SFS-EN-1995-1-2, eli Eurokoodi 5:n mukaan. Eurokoodi 5:ssä on esitetty yksinkertaistetut palorasitukset, joissa rakenteeseen oletetaan kohdistuvan joko standardipalorasitus (kuva 5) tai parametrinen palorasitus. Kuvaajan pystyakselin asteet ilmaisevat palavan kaasun lämpötilan ja vaaka-akselilla on aika minuutteina.

Standardin ISO-834 mukaisessa palorasituksessa olevan kantavan rakenneosan tulee säilyä kantavana palonkestävyysvaatimuksen R vaatiman ajan. Kantavan rakenteen muodonmuutoksia ei tarvitse tarkastella, jos rakenteen muodonmuutokset eivät vaikuta osastoivuuteen. (RIL 205-2-2009, 15)



KUVA 5. Standardin ISO-834 mukainen palorasitus (Gyproc, standardipalo 2011)

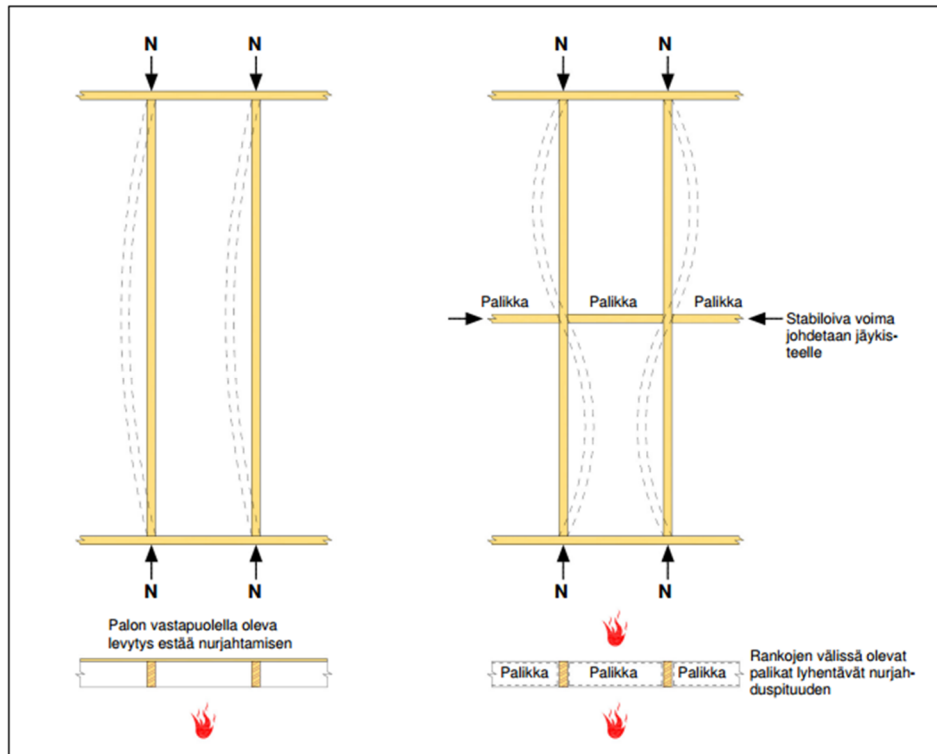
Parametrisessa palorasituksessa on mukana myös jäähtymisvaihe. Käytettäessä parametrista palorasitusta mitoituksessa rakenteen tulee säilyä kantavana määritellyn palonkestävyysajan tai koko palon ajan mukaan lukien jäähtymisvaihe. (SFS-EN 1995-1-2, 28.)

Palonkestävyyden osoittamisen voi Eurokoodi 5:n mukaan tehdä kolmella tavalla: Rakennesatarkasteluna, rakenteiden osien tarkasteluna tai koko rakenteen tarkasteluna.

Palokestävyys voidaan osoittaa myös polttokokeista saaduilla tuloksilla tai tulosten ja laskelmien yhdistelyllä. Eurokoodi sallii myös kehittyneiden laskentamenetelmien käytön, niistä lisää kohdassa 6. Lisäksi palomitoituksen voi tehdä hyväksytyllä taulukkomitoituksella. Tässä opinnäytetyössä keskitytään laskennalliseen rakenneosatarkasteluun, jolloin rakenteeseen oletetaan kohdistuvan standardoidun lämpötila-aikakäyrän mukainen palorasitus.

Palomitoitus eroaa normaalitilanteen mitoituksesta siten, että siinä käytetään eri yhdistelykertoimia kuormissa ja eri osavarmuuslukuja materiaaliominaisuuksissa. Lisäksi palomitoituksessa ei tarvitse ottaa huomioon puristusta kohtisuoraan syitä vastaan. Myöskään leikkausta ei tarvitse ottaa huomioon, jos kyseessä on pyöreä tai suorakaide poikkileikkaus. Huomioitavaa on kuitenkin, että lovetujen palkkien jäännöspoikkileikkauksen on oltava vähintään 60 % normaalitilanteen mitoituksen vaadittavasta poikkileikkauksesta. (RIL 205-2-2009. s16, 18, 33)

Kantavat rakenteet suunnitellaan siten, että ne pysyvät palossa kantavana koko vaaditun palonkestoajan. Tämän lisäksi on huomioitava, että myös rakenteen stabiilitetti pysyy tulipalossa vaaditun palonkestoajan. Jäykistäviä rakenteita saattaa palaa pois ja tällöin rakenne on mitoittava nurjahdukselle ja kiepahdukselle ilman niitä, tai suunniteltava kokonaan oma stabiilitettituenta palotilannetta varten. Kuvassa 6 on esimerkki palotilanteen stabiilitettituennasta, kun jäykistävästä seinästä palaa levyt pois. (Puuinfo. 2013, 5.)



KUVA 6. Esimerkki nurjahdustuentamenetelmästä palotilanteessa. (Puuinfo. 2013, 6.)

Kuormat

Tulipalo on onnettomuustilanne, jonka kuormien aiheuttama rasitus hetkellä $t=0$ määritetään seuraavalla kaavalla (yhtälö 1). (RIL 205-2-2009, 18.)

$$E_{d,fi} = G_k + \sum_{i \geq 1} \Psi_{fi,i} Q_{k,i} \quad (1)$$

Kaavassa:

G_k pysyvän kuorman ominaisarvo

$Q_{k,i}$ muuttuvan kuorman ominaisarvo

$\Psi_{fi,i}$ muuttuvien kuormien yhdistelykerroin palotilanteessa (Taulukko 5.)

TAULUKKO 5. Muuttuvan kuorman yhdistelykertoimet. (RIL 205-2-2009, 19.)

Kuorma	ψ_{fi} luonnonkuorma määäävä	ψ_{fi} hyötykuorma määäävä
Hyötykuormat rakennuksissa		
Luokka A: asuintilat	0,3	0,3
Luokka B: toimistotilat	0,3	0,3
Luokka C: kokoontumistilat	0,3	0,3
Luokka D: myymälätilat	0,6	0,6
Luokka E: varastotilat	0,8	0,8
Luokka F: liikennöitävät tilat, esim. autotallit	0,6	0,6
Luokka G: liikennöitävät tilat, raskaat ajoneuvot	0,3	0,3
Luokka H: vesikatot	0	0
Lumikuorma, kun		
$s_k < 2,75 \text{ kN/m}^2$	0,4	0,2
$s_k \geq 2,75 \text{ kN/m}^2$	0,5	0,2
Jääkuorma	0,3	0
Rakennusten tuulikuormat	0,2	0

Rasitus voidaan laskea myös yksinkertaisemmin normaalilämpötilamitoituksen perusteella käyttämällä seuraavaa kaavaa (yhtälö 2). (RIL 205-2-2009, 18.)

$$E_{d,fi} = \eta_{fi} * E_d \quad (2)$$

Kaavassa:

η_{fi} kuorman mitoitusarvon pienennyskerroin palotilanteessa

E_d voimasuureen mitoitusarvo normaalilämpötilamitoituksessa.

Eurokoodi 5:n Suomen kansallisen liitteen NA SFS-EN1990-YM mukaan pienennyskerroin η_{fi} on 0,6, paitsi E-luokan hyötykuormille käytetään arvoa 0,7.

Materiaaliominaisuuksien ja kestävyysien mitoitusarvot

Lujuus- ja jäykkyysominaisuuksien mitoitusarvot määritetään yhtälöillä 3 ja 4: (SFS-EN 1995-1-2, 30.)

$$f_{d,fi} = k_{mod,fi} \frac{f_{20}}{\gamma_{M,fi}} \quad (3)$$

$$S_{d,fi} = k_{mod,fi} \frac{S_{20}}{\gamma_{M,fi}} \quad (4)$$

Kaavoissa:

$f_{d,fi}$	lujuuden mitoitusarvo palotilanteessa
$S_{d,fi}$	jäykkyysominaisuuksien mitoitusarvo palotilanteessa
f_{20}	lujuusominaisuuksien 20 % fraktiili normaalilämpötilassa = $k_{fi} f_k$
k_{fi}	kerroin, jonka arvot esitetään taulukossa 6
$k_{mod,fi}$	muunnoskerroin palotilanteessa, Suomessa $k_{mod,fi} = 1$
$\gamma_{M,fi}$	puun osavarmuusluku palotilanteessa.

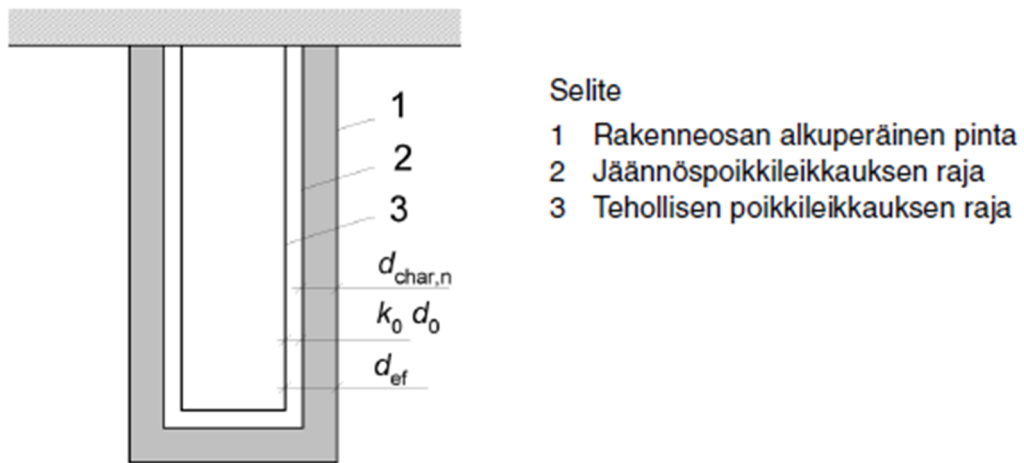
TAULUKKO 6. Kerroin k_{fi} (SFS EN 1995-1-2, 32.)

	k_{fi}
Sahatavara	1,25
Liimapuu	1,15
Puulevyt	1,15
LVL	1,1
Leikkausliittimien avulla muodostettu liitos, jossa sivukappaleet ovat puuta tai puulevyä	1,15
Leikkausliittimien avulla muodostettu liitos, jossa sivukappaleet ovat terästä	1,05
Liitokset, joissa liittimet kuormittuvat pitkittäin	1,05

5.1 Tehollisen poikkileikkauksen menetelmä

Eurokoodi 5:ssä on kaksi yksinkertaistettua menetelmää palonkestävyyden suunnitteluun, tehollisen poikkileikkauksen menetelmä ja tehollisten ominaisuuksien menetelmä. RIL 205-2-2009:n mukaan Suomessa ei kuitenkaan käytetä jälkimmäistä menetelmää.

Tehollisen poikkileikkauksen menetelmässä käytetään kestävyyslaskennassa tehollista poikkileikkausta (kuva 7), joka saadaan vähentämällä puun alkuperäisestä poikkileikkauksesta tehollisen hiiltymissyvyyden d_{ef} verran jokaiselta sivulta, jotka ovat palolle alttiina. (RIL 205-2-2009, 31.)



KUVA 7. Jäännöspoikkileikkauksen ja tehollisen poikkileikkauksen määritelmät (SFS-EN 1995-1-2, 56.)

Tehollisen poikkileikkauksen menetelmässä rakenne siis ylimitoitetaan hiiltemissävyvyyden verran. Ylimitoitus tehdään, koska vaaditun palonkestoajan jälkeen puusta on palanut tehollisen hiiltemissävyvyyden verran pois ja jäljelle jääneen poikkileikkauksen pitää kestää palotilanteen rasitukset.

5.1.1 Hiiltymissyvyys

Puun hiiltymisen otetaan huomioon palomitoituksessa. Hiiltynyt osa sekä hiiltymisrajan lähellä oleva puukerros $k_0 d_0$ muodostavat tehollisen hiiltymissyvyyden d_{ef} . Tämä vähennetään alkuperäisestä poikkileikkauksesta, jolloin jäljelle jää tehollinen poikkileikkaus. Hiiltymisrajan lähellä oleva puukerros $k_0 d_0$ on vyöhyke, jonka lujuuden oletetaan heikentyneen palossa. Hiiltymisen otetaan huomioon kaikissa puupinnoissa, jotka ovat joko suoraan altistuneet palorasitukselle tai jotka alkavat hiiltä palon aikana suojauksen petettyä. (RIL 205-2-2009, 21.)

Hiiltymissyvyys d_{ef} lasketaan seuraavalla kaavalla (yhtälö 5), jossa d_{char} on hiilikerros ja $k_0 d_0$ on lähellä hiiltymisrajaa oleva puukerros. Näiden kerrosten lujuus- ja jäykkysominaisuuksien oletetaan tehollisen poikkileikkauksen menetelmässä olevan nolla. Kun tehollinen poikkileikkaus on saatu selville, tehdään rakenneosan mitoitus tällä poikkileikkauksella käyttämällä normaalilämpötilan lujuus- ja jäykkyyssarvoja. (RIL 205-2-2009, 31.)

$$d_{ef} = d_{char} + k_0 d_0 \quad (5)$$

d_{char} hiiltymissyvyys

d_0 7 mm

k_0 kerroin, jonka arvot esitetään taulukossa 7.

TAULUKKO 7. Kertoimen k_0 määrittäminen (RIL 205-2-2009, 32.)

Suojaamaton pinta $t < 20$ min $t \geq 20$ min	$t/20$ 1,0
Palosuojattu pinta $t_{ch} \leq 20$ min $t_{ch} > 20$ min	$t/20$, kun $t < 20$ min 1,0, kun $t \geq 20$ min t/t_{ch} , kun $t \leq t_{ch}$ 1,0, kun $t > t_{ch}$

t_{ch} puukannattajan hiiltymisen alkamishetki

Hiiltymisen voi olla yksidimensionaalista $d_{char,0}$ tai nimellistä $d_{char,n}$ (kuva 8). Yksidimensionaalista hiiltymistä tapahtuu levymaisissa rakenteissa, joissa palorasitus on vain yhdellä puolella rakenneosaa ja hiiltymisen pääsee nimensä mukaan tapahtumaan vain

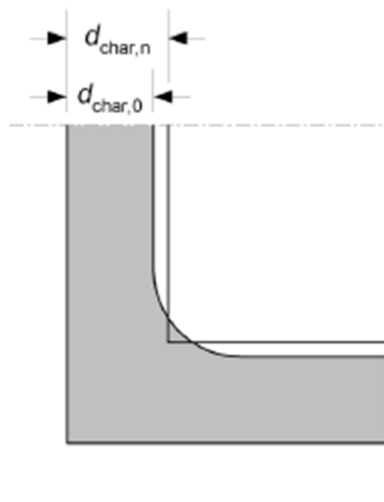
yhdestä suunnasta. Rakenteen poikkileikkauksen ollessa suorakaide, joka on palolle alttiina useammalta sivulta, käytetään nimellistä hiiltemissyvyyttä. Nimellinen hiiltemissyvyys ottaa huomioon kulmien pyöristyksen ja halkeamien vaikutuksen. Hiiltemissyvydet lasketaan seuraavista kaavoista (yhtälöt 6 ja 7). (RIL 205-2-2009, 22-23.)

$$d_{char,0} = \beta_0 t \quad (6)$$

$$d_{char,n} = \beta_n t \quad (7)$$

Yhtälöissä:

$d_{char,0}$	hiiltemissyvyyden mitoitusarvo, kun hiilteminen on yksidimensionaalista
β_0	yksidimensionaalisen hiiltemisnopeuden mitoitusarvo standardipalorasituksessa (taulukko 7)
t	palorasituksen kesto
$d_{char,n}$	nimellisen hiiltemisnopeuden mitoitusarvo, joka sisältää kulmapyöristysten vaikutuksen
β_n	nimellisen hiiltemisnopeuden mitoitusarvo, johon sisältyy kulmapyöristysten ja halkeamien vaikutus (taulukko 8)



KUVA 8. Nimellinen $d_{char,n}$ ja yksidimensionaalinen $d_{char,0}$ hiiltemissyvyys. (SFS-EN 1995-1-2, 42.)

Puutuotteiden hiiltemisnopeudet vaihtelevat. Hiiltemisnopeuteen vaikuttaa puutuotteen tiheys. Myös pinnan karkeus, kulmien terävyys ja halkeamat vaikuttavat hiiltemisnopeuteen. Taulukossa 8 on esitetty eri puutuotteiden hiiltemisnopeuksia.

TAULUKKO 8. Hiiltymisnopeuksien mitoitusarvoja. (SFS-EN 1995-1-2, 44.)

	β_0 mm/min	β_n mm/min
a) Havupuu ja pyökki		
Liimapuu, jonka ominaistiheys $\geq 290 \text{ kg/m}^3$	0,65	0,7
Sahatavara, jonka ominaistiheys $\geq 290 \text{ kg/m}^3$	0,65	0,8
b) Lehtipuu		
Lehtipuusta valmistettu sahatavara tai liimapuu, jonka ominaistiheys on 290 kg/m^3	0,65	0,7
Lehtipuusta valmistettu sahatavara tai liimapuu, jonka ominaistiheys $\geq 450 \text{ kg/m}^3$	0,50	0,55
c) LVL, jonka ominaistiheys on $\geq 480 \text{ kg/m}^3$	0,65	0,7
d) Levyt ja lautaverhoukset		
Lautaverhoukset	0,9 ^a	–
Vaneri	1,0 ^a	–
Muut puulevyt kuin vaneri	0,9 ^a	–
^a Arvot pätevät, kun ominaistiheys on 450 kg/m^3 ja levyn paksuus on 20 mm; ks. kohtaa 3.4.2(9) tiheyden tai paksuuden poiketessa näistä arvoista.		

5.2 Palosuojatut palkit ja pilarit

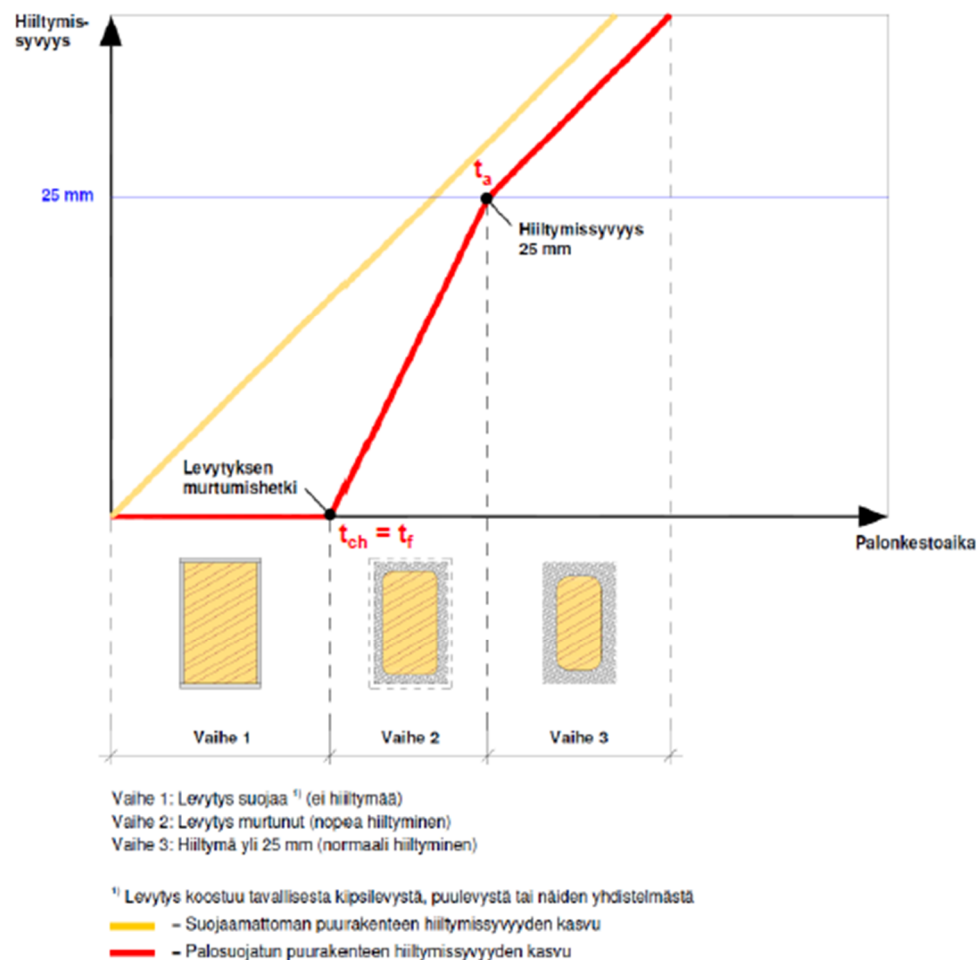
Palosuojauksen tarkoitus on hidastaa rakenteen hiiltymistä ja hiiltymisen alkamista tai estää hiiltymisen kokonaan ja tällä tavoin pidentää rakenteen aikaa säilyä kantavana palossa. Rakenteet voivat olla joko palolta suojaamattomia, palolta koko rasituksen ajan suojattuja tai suojattuja osan aikaa palorasituksesta. Puurakenne voidaan suojata palolta esimerkiksi erilaisilla kipsilevyillä, puulevyillä tai palovillalla. Myös rakenteen paksuntaminen puulla lisää palonkestoaikaa, eli toimii palosuojauksena.

Kipsikartonkilevy on yleinen suojausmateriaali puurakenteille. Kipsikartonkilevyn palonsuojaominaisuus perustuu siihen, että se sisältää kidevettä. Tulipalossa kipsissä oleva kidevesi höyrystyy hidastaen puun lämpötilan nousemista ja ehkäisten puun syttymistä. (Puuinfo: Puurakenteiden paloturvallisuus.)

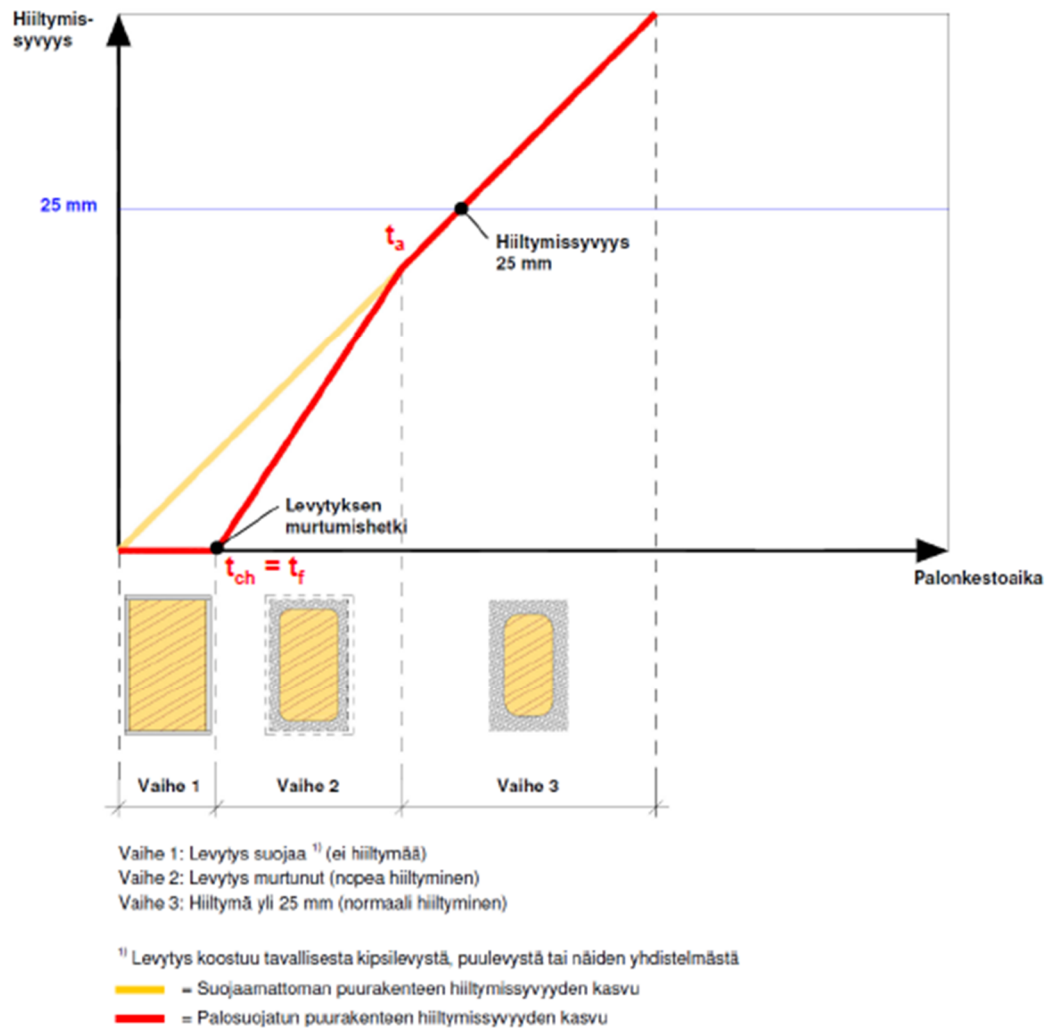
Rakenne on suojattu vain osan palorasituksen ajasta, jos palosuojaus murtuu. Palosuojauksen murtuminen voi johtua siitä, että se hiiltyy puhki tai siitä, että liittimillä on liian pieni tunkeuma ehjään puuhun, niitä on liian vähän tai niiden reuna- tai päätteäisyydet ovat liian pienet. (RIL 205-2-2009, 29)

Palosuojatun rakenteen mitoituksessa hiiltymisen oletetaan alkavan hetkellä t_{ch} , joka on tietty aika palon alkamisesta. Palokipsilevyllä tai kivivillalevyllä suojatussa rakenteessa hiiltymisen voi alkaa jo ennen palosuojauksen murtumista ja edetä murtumishetkeen t_f

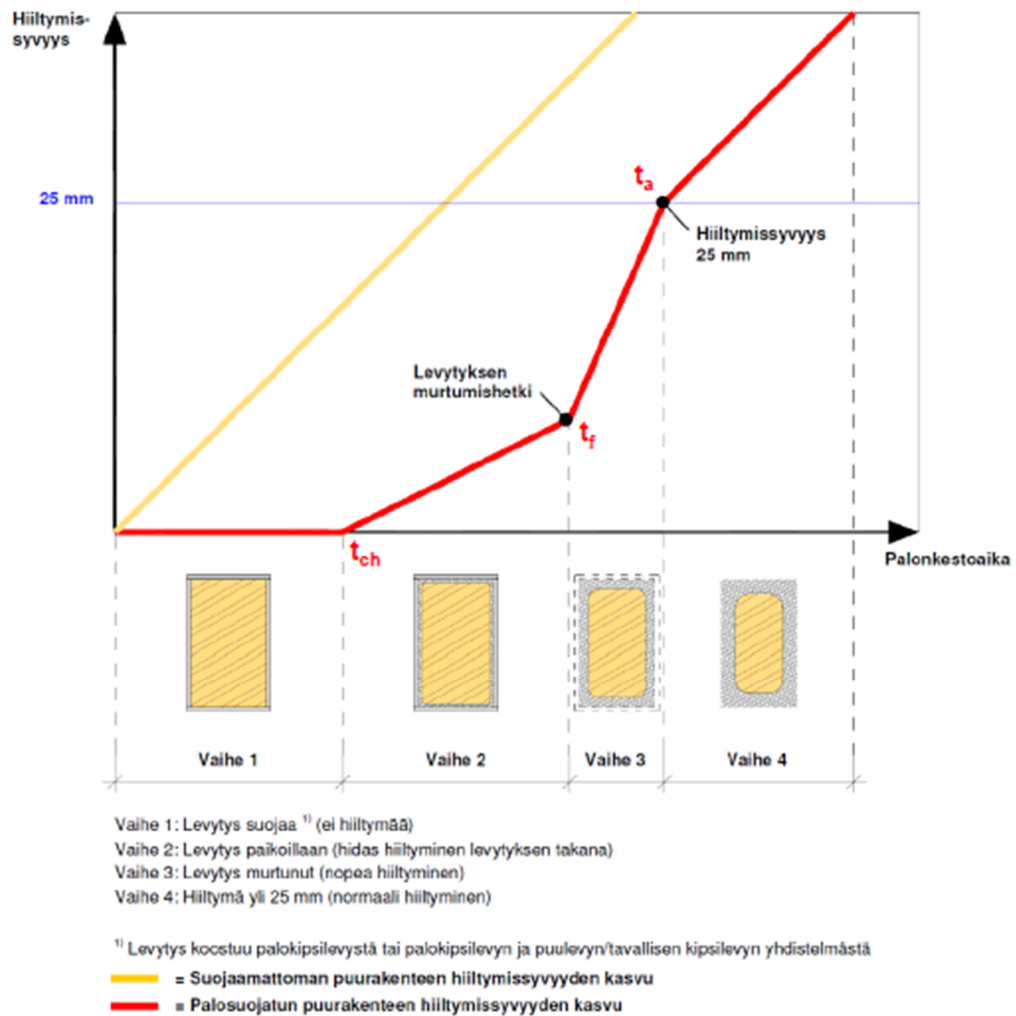
asti hitaammalla hiiltymisnopeudella, kuin taulukossa 8 on esitetty. Palosuojauksen murtumisen jälkeen hiiltymisen on taulukon 8 mukaista hiiltymistä nopeampaa hetkeen t_a asti. Ajassa t_a hiiltymisen on edennyt 25 mm tai vastaavan palosuojaamattoman rakenteen hiiltymisen verran sen mukaan, kumpi näistä on pienempi. Tämän ajan jälkeen hiiltymisnopeus on taulukon 8 mukaista. Hiiltymissyvyyden kehittyminen ajan funktiona erilaisilla palosuojauksilla esitetään seuraavissa kuvissa. Kuvissa 9 ja 10 hiiltymissyvyys etenee kuten rakenteessa, joka on suojattu puulevyllä, tavallisella kipsilevyllä (tyyppi A) tai tuulensuojakipsilevyllä (tyyppi H). Kuvassa 11 hiiltymissyvyys etenee kuten palokipsilevyillä (tyyppi F) suojatuissa rakenteissa. (RIL 205-2-2009, 24-25.)



KUVA 9. Hiiltymissyvyyden kehittyminen, kun $t_{ch} = t_f$ ja hiiltymissyvyys hetkellä $t_a \geq 25$ mm. (Puuinfo. 2014.)



KUVA 10. Hiiltemissyvyyden kehittyminen, kun $t_{ch} = t_f$ ja hiiltemissyvyys hetkellä $t_a < 25$ mm. (Puuinfo. 2014.)



KUVA 11. Hiiltemissyvyyden kehittyminen, kun $t_{ch} < t_f$. (Puuinfo.2014.)

6 PUURAKENTEIDEN PALOMITOITUSOHJELMAT

Rakenteiden palomitoitukseen on olemassa monia eri ohjelmia ja laskentapohjia. Useimmiten Excelillä tai Mathcadilla tehdyt laskentapohjat tekevät palomitoituksen rakenneosatarkasteluna. Monet ohjelmat taas käyttävät palomitoituksessa kehittyneempiä laskentamenetelmiä.

Kehittyneet laskentamenetelmät voivat olla todennäköisyyteen perustuvia tai deterministisiä, eli lainalaisuuksiin perustuvia. Todennäköisyyspohjainen analysointi perustuu oletettuun palonkehitykseen ja se on yleistymässä etenkin suurissa kohteissa. (Fire safety in timber buildings, 23.)

6.1 Toiminallinen palomitoitus

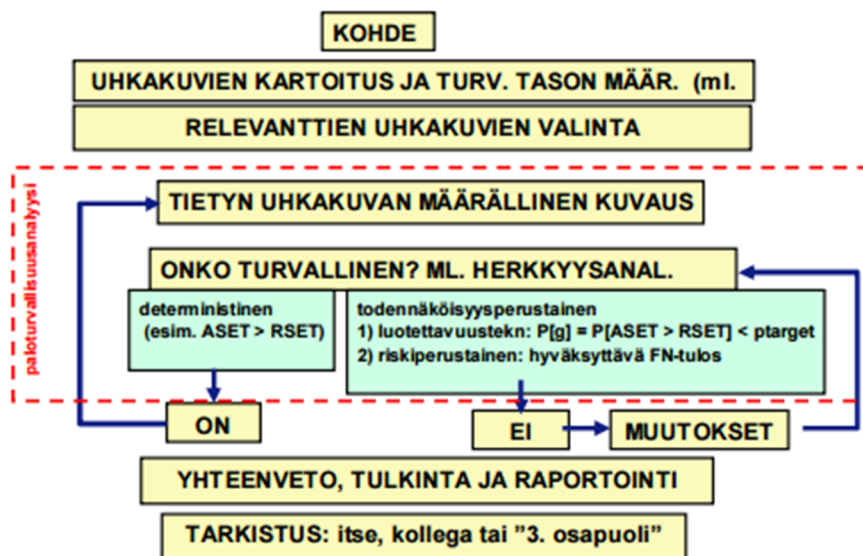
Suomen Rakentamismääräyskokoelman osan E1 mukaan paloturvallisuusvaatimukset täyttyvät, kun noudatetaan suunnittelussa E1:sen paloluokkia ja lukuarvoja tai suunnitellaan rakennus oletettuun palonkehitykseen perustuen. Myös molempia menetelmiä voidaan käyttää samassa kohteessa. (Suomen Rakentamismääräyskokoelma E1, 8.) Toiminnallinen, eli oletettuun palonkehitykseen pohjautuva palomitoitus soveltuu vaativien puurakenteiden suunnitteluun, koska se ottaa huomioon muun muassa automaattisen sammutuslaitteiston ja savunpoiston, joita ei taulukkoarvoilla suunniteltaessa huomioida (Puuinfo. 2015, 1).

Puurakenteisen rakennuksen toiminnallisessa paloturvallisuussuunnittelussa selvitetään kohteelle todennäköiset uhat ja mitoituspalot sekä tehdään riskianalyysi. Lisäksi tarkastellaan laskennallisesti lämpötilojen kehittyminen, savunmuodostuminen sekä poistumisturvallisuus. (Puuinfo. 2015, 2.)

Toiminnallisen paloteknisen suunnittelun kulkua kuvaa kuvio 1. Se alkaa riskianalyysin teolla, jossa arvioidaan riskit ja suunnitellaan toimenpiteet, joilla riskit saadaan riittävän pieniksi. Tavoite voi olla esimerkiksi, että rakenteelle vaarallinen palo saa tapahtua ker-
ran 10 000 vuodessa. Riskianalyysi tehdään tilastollisten todennäköisyyksien pohjalta. Palontorjuntakeinoilla alennetaan palovaarojen toteutumisen mahdollisuus riittävän pie-

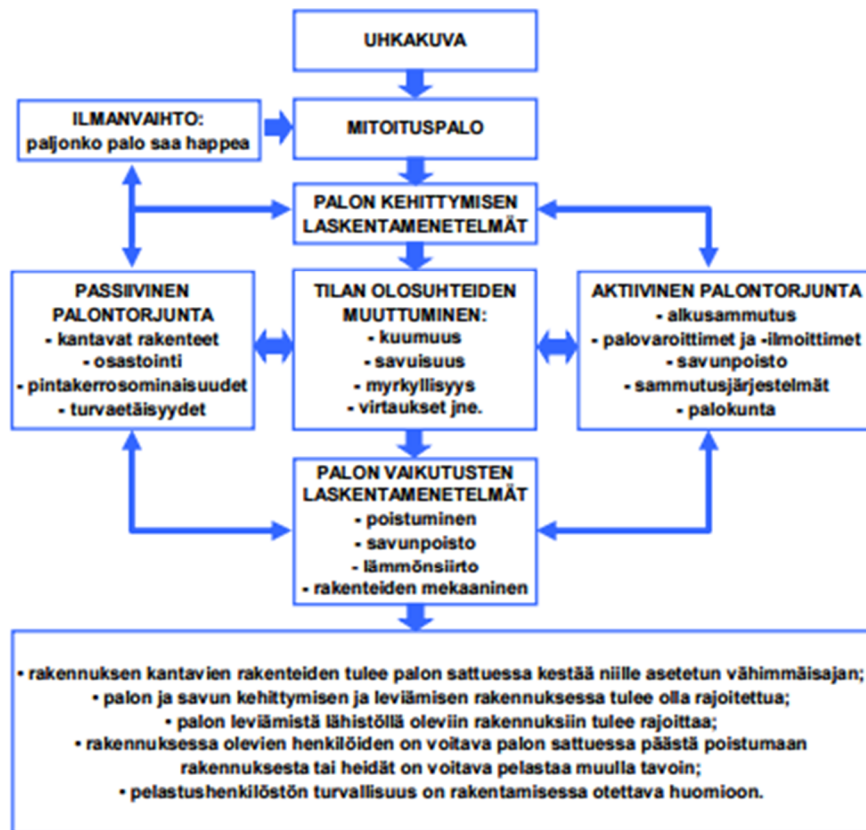
neksi. Palovaarojen riski ja niiden torjuntakeinojen vaikutus selvitetään tilastollisen todennäköisyysjakauman avulla. (Puuinfo. 2015, 2-3.)

Oletettuun palonkehitykseen perustuva palomitoitus ottaa huomioon palotilan geometrian, palokuorman tyypin, määrän ja sijainnin, hapen määrän sekä hiipumisvaiheen. Standardipalorasitus ei ota näitä asioita huomioon, joten toiminnallinen palomitoitus on huomattavasti tarkempi menetelmä. (Ruukki 2008, 4.)



KUVIO 1. Toiminnallisen paloteknisen suunnittelun kulku. (Hietaniemi, 4.)

Palotilanteen mallintamiseen palon kehittymisen selvittämiseksi käytettäviä ohjelmia ovat esimerkiksi PyroSim sekä Natonal Instituten of Standards and Technologyn kehittämä ilmainen Fire Dynamic Simulator (FDS). Kuvio 2 esittää toiminnallisen paloteknisen suunnittelun tärkeimpiä tekijöitä.



KUVIO 2. Toiminnallisen paloteknisen suunnittelun tärkeimpiä osatekijöitä ja niiden välisiä riippuvuuksia. (Hietaniemi, 4.)

Rakennuslupamenettelyn yhteydessä esitetään toiminnallisen paloteknisen suunnittelun perusteet, käytetyt mallit ja saadut tulokset. Näissä asiakirjoissa selvitetään ainakin seuraavat asiat:

- Rakennuksen ja paloturvallisuuslaitteiden kuvaus
- Tehdyt oletukset rakennuksen käytöstä
- Tehdyt oletukset palokunnan toimintamahdollisuuksista
- Toiminnallisen paloteknisen suunnittelun sovellusalueiden rajausta ja yksilöinti
- Perustelut valituille palotilanteille
- Vikaantumistarkastelu
- Paloturvallisuuteen vaikuttavat huolto- ja kunnossapitotoimet
- Käytettyjen koe- ja laskentamenetelmien kuvaus
- Tulokset herkkyyksianalyysiin
- Hyväksymiskriteerit ja tulosten vertaaminen niihin
- Suunnitelmien tarkastaminen (Puuinfo. 2015, 5-7.)

6.2 Laskentapohjat palomitoitukseen

Tutkimukseni perusteella laskentapohjat on useimmiten tehty Excel tai Mathcad -tietokoneohjelmistoilla. Laskentapohjien palomitoitus perustuu standardipalokäyrän mukaiseen tulipaloon ja on näinollen yksinkertaistettumpi tapa tehdä rakenteellinen palomitoitus.

Puuinfon sivuilta saa ladattua ilmaiseksi palomitoitukseen liittyviä laskentatyökaluja. Tarjolla on laskentapohja kantavan rankarakenteisen seinän palomitoitukseen, seinän osastoivuuden mitoitukseen, sekä palkiston palomitoitukseen. (Puuinfo. Mitoitusohjelmat). Kaikki nämä ovat Excel-pohjaisia. Kantavan seinän palomitoitukseen tarkoitettuun työkaluun syötetään rakenteen tiedot: Palosuojatuotteen tyyppi, runkotolpan koko ja materiaali, eristetyyppi, palon sijainti, vaadittu palonkesto aika, nurjahduspituus sekä rasitukset. Tämän jälkeen työkalu laskee tolpan käyttöasteen ja havainnollistaa tulokset pylväsdiagrammeina.

Suunnittelu- ja konsultointialan yritysten työnantajajärjestö SKOL Ry:n alaisuudessa on toteutettu hanke, jossa rakennesuunnittelutoimistot ja ammattikorkeakoulut tekivät yhdessä erilaisia laskentapohjia rakenteiden suunnitteluun (Skol Ry. Eurocode-laskentapohjat). Puupilarin mitoitukseen löytyy laskentapohja, jolla saa tehtyä myös palotilanteen mitoituksen. Pilaria ei saa kuitenkaan palosuojattua millään tavalla tässä laskentapohjassa. Nykyään yleisesti käytössä olevaa liimapuuluokkaa GL30c ole vaihtoehtoisissa. Myös tehollinen poikkileikkaus on laskettava itse tähän laskentapohjaan.

Stora Ensolla on nettisivuillaan CLTengineer ohjelma, jolla pystyy tekemään myös puisen palkin ja pilarin palomitoituksen. Ohjelma toimii selaimessa ja on ilmainen (CLT.info uutiset 2015). Materiaalivaihtoehtoina puiselle palkille tai pilarille on havupuu C16, C24, C30 sekä liimapuut GL 24h, GL 28 h, GL 30h ja kertopuu. Vaihtoehtoina rakenteen suojaukselle on erilaiset vanerilevyt, joiden lisäksi voidaan valita lisäpalonsuojaus eri paksuisista A ja F-tyypin kipsilevyistä. Ohjelma on selkeä ja helppokäyttöinen ja se antaa selkeän tulosteen.

7 LASKENTAPOHJA PUUPALKIN JA -PILARIN PALOMITOITUKSEEN

Puisen palkin tai pilarin palomitoitukseen löytyi siis joitakin valmiita laskentapohjia ja ohjelmia, mutta esimerkiksi tuotevalmistajien ohjelmissa käytetään yleensä vain omia tuotteita, joka tässä tapauksessa rajaa rakenneosan ja palonsuojalevyn tyyppin materiaali- vaihtoehtoja. Oman laskentapohjan erona useampiin eri tuotevalmistajien ohjelmiin ja laskentapohjiin voidaan pitää materiaalivaihtoehtojen rajattomuutta. Eurokoodi 5:ssä mainitaan, että jos rakenteelta vaaditaan palotilanteessa mekaanista kestävyyttä, se tulee suunnitella siten, että sen kantavuus säilyy vaaditun palonkestoajan. Laskentapohjan avulla mitoittaminen on huomattavasti käsin laskemista nopeampaa. Tästä syystä tilaajayrityksellä oli tarve puisen palkin ja pilarin palomitoitusohjelmalle.

Laskentapohja tehtiin Microsoft Excel -taulukkolaskentaohjelmalla. Tekemisessä hyödynnettiin makroja sekä VBA -ohjelmointia lopullisen ulkoasun ja laskentapohjan käytön selkeyttämiseksi. Ulkoasultaan laskentapohja ja tuloste ovat tilaajayrityksen yhteisten ohjeiden mukaisia.

Laskentapohja laskee puisen palkin tai pilarin tehollisen poikkileikkauksen vaaditun ajan kuluttua. Tällä poikkileikkaukselle laskentapohja tekee mitoituksen palotilanteen rasituksilla. Tulokseksi laskenta antaa palkin mitoituksessa käyttöasteet taivutukselle ja kiepahdukselle. Pilarin mitoituksessa laskenta antaa käyttöasteet puristukselle, kiepahdukselle sekä nurjahdukselle molempiin suuntiin. Laskenta perustuu standardeihin SFS-EN 1995-1-1 ja SFS-EN 1995-1-2 sekä näiden kansalliseen liitteeseen.

7.1 Lähtötiedot

Laskentapohjassa on etusivu, jossa valitaan mitoitetaanko palkki vai pilari. Valinnan jälkeen laskentapohja siirtyy välilehdelle, jossa syötetään kaikki tarvittavat tiedot laatu-koituihin soluihin. Lähtötiedoiksi syötettävät asiat ovat pilarin ja palkin laskennassa samat, mutta tämän jälkeen syötettävät asiat eroavat toisistaan. Ensiksi syötetään projektin tiedot sille varatulle alueelle. Tämän jälkeen käyttäjä valitsee rakenneosan materiaalin ja palonsuojatuotteen.

Palkin tai pilarin materiaaliksi voidaan valita jokin seuraavista:

- Liimapuu GL30c
- Liimapuu GL30cs
- Liimapuu GL32c
- Sahatavara C24
- Sahatavara C30
- Kerto-S

Palonsuojatuotteeksi voidaan valita:

- Ilman suojaa
- A-tyypin 13mm kipsilevy
- F-tyypin 15mm palokipsilevy
- F-tyypin 18mm palokipsilevy
- H-tyypin 9mm kipsilevy
- Vaneri, jonka paksuus syötetään itse
- 2x A-tyypin 13mm kipsilevy
- 2x F-tyypin 15mm palokipsilevy
- 2x H-tyypin 9mm kipsilevy
- A-tyypin 13mm kipsilevy + F-tyypin 15mm palokipsilevy

Materiaalin valinta vaikuttaa laskennalliseen palonkesto-aikaan, koska eri materiaaleilla on eri hiiltymisnopeudet ja lujuusarvot. Palonsuojatuotteen valinta vaikuttaa siihen, kuinka nopeasti rakenne alkaa hiiltä. Näiden lisäksi lähtötietoihin syötetään rakennesosan dimensiot, vaadittu palonkesto-aika sekä palolle alttiina olevat sivut. Lähtötietojen perusteella laskentapohja laskee hiiltymissyvyyden, rakenteen tehollisen poikkileikkauksen sekä materiaaliominaisuudet palotilanteessa.

7.2 Rasitukset

Laskentapohja rajattiin tehollisen poikkileikkauksen ja kestävyyslaskentaan, se ei siis laske rasituksia. Rasitukset lasketaan käsin tai statiikkaohjelmalla ja syötetään laskentapohjaan. Rasitusten syöttämiseen on kaksi vaihtoehtoa, joko syötetään tarkasti lasketut palotilanteen rasitukset tai sitten syötetään normaalilämpötilamitoituksen rasitukset, jotka laskentapohja muuttaa palotilanteen rasituksiksi Eurokoodi 5:n sallimalla

yksinkertaistetulla tavalla. Yksinkertaistettu tapa antaa suuremmat rasitukset, joten mitoitus on reilusti varmallalla puolella. Tarkempaan ja kustannustehokkaampaan tulokseen päästään siis syöttämällä palotilanteen rasitukset.

Taulukossa 9 on esitetty kahden palkin käyttöasteet taivutukselle ja kiepahdukselle palotilanteessa. Ensimmäisessä palkissa vaikuttaa omapaino ja lumikuorma, toisessa omapaino, lumikuorma ja hyötykuorma. Tarkka sarakkeen alla on käyttöasteet, jotka on saatu laskemalla rasitukset onnettomuustilanteen yhdistelykertoimilla RIL 205-2-2009 kaavalla 2.7.1S. Yksinkertaistettu sarakkeen alla on käyttöasteet, jotka on saatu laskemalla rasitukset yksinkertaistetulla menetelmällä RIL 205-2-2009 kaavalla 2.8. Taulukosta 9 nähdään, että laskemalla palotilanteen rasitukset yksinkertaistetulla menetelmällä käyttöasteet ovat huomattavasti suurempia. Käyttäjän kannattaa siis laskea palotilanteen rasitukset itse.

TAULUKKO 9. Vertailu palkin käyttöasteista palotilanteessa, kun rasitukset on laskettu eri menetelmillä.

		Käyttöaste %	
		Tarkka	Yksinkertaistettu
Palkki 1	taivutus	33	49
omapaino+lumi	kiepahdus	67	98
Palkki 2	taivutus	38	60
omapaino+hyöty+lumi	kiepahdus	84	130

7.3 Tulokset

Palkin laskennassa laskentapohja antaa tulokseksi taivutuskestävyyden ja kiepahduskestävyyden käyttöasteet. Taivutuskestävyyden laskenta onnistuu jo aiemmin syötettyjen tietojen pohjalta. Kiepahduskestävyyden laskennassa käyttäjän tarvitsee valita onko kuormituksen sijainti palkin puristetun vai vedetyn reunan korkeudella. Tämä vaikuttaa palkin teholliseen pituuteen. Lisäksi käyttäjä valitsee onko palkkia kiepahdustuettu poikittaissuunnassa vai ei, ja jos on, niin millä jaolla kiepahdustuet ovat. Myös tämä vaikuttaa palkin teholliseen pituuteen kiepahduskestävyyden laskennassa. Käyttäjän on kuitenkin huomioitava, että jos käytetään kiepahdustukia, niin myös niiden on säilytettävä.

tävä kapasiteettinsa tulipalossa. Näiden valintojen jälkeen laskenta antaa käyttöasteen kiepahduskestävyydelle.

Pilarin laskennassa laskentapohja antaa tulokseksi käyttöasteet puristukselle, nurjahdukselle molempiin suuntiin sekä kiepahdukselle. Puristuskestävyyden laskentapohja laskee jo aiemmin annettujen tietojen pohjalta. Nurjahduskestävyyden laskennassa käyttäjä valitsee pilarin tuentatavan. Vaihtoehtoina on, että pilari on

- kiinnitetty toisesta päästään jäykästi ja toisesta nivelisesti
- kiinnitetty nivelisesti molemmista päistään
- poikittaistuettu nurjahduksen suunnassa
- kiinnitetty toisesta päästään jäykästi ja toisesta ei mitenkään.

Tuentatapa vaikuttaa pilarin nurjahduspituuteen. Kiepahduskestävyyden laskennassa käyttäjä tekee samat valinnat, kuin palkin kiepahduskestävyyttä laskettaessa.

Kun haluttu laskelma on tehty, käyttäjä painaa painiketta ”Valitse tulostin”, josta aukeaa tulostimen valintaikkuna. Tämän jälkeen käyttäjä painaa painiketta ”Tulosta”, josta Excel tulostaa valmiiksi määritellyn alueen käyttäjälle. Tulostusalueella näkyy lähtötiedot, kuten rakenneosan dimensiot ja materiaali, palonsuojamateriaali ja palolle alttiina olevat sivut sekä vaadittu palonkesto aika. Tämän lisäksi siinä näkyy mm. hiililymissyvyys, tehollinen poikkileikkaus, materiaaliominaisuudet palotilanteessa, räsitukset sekä lopulliset käyttöasteet.

7.4 Laskentapohjan käytettävyys

Laskentapohja tarkastettiin tilaajayrityksessä työskentelevän rakennesuunnittelijan toimesta. Pieniä korjausehdotuksia tuli lähinnä muotoiluun ja ohjeiden antamiseen liittyen. Myös pari vähäistä virhettä laskuissa löydettiin. Nämä asiat korjattiin, jonka jälkeen laskentapohja todettiin toimivaksi ja otettiin käyttöön.

Laskentapohjan tarkoituksena on, että palomitoituksen pystyy tekemään helposti ja asiaan paljoakaan perehtymättä. Tästä syystä laskentapohjan käyttöön liittyen tehtiin koe, jolla haluttiin selvittää pystyykö palomitoitukseen syvällisemmin perehtymätön raken-

nesuunnittelija tekemään laskentapohjan avulla palomitoituksen. Kokeen avulla selvitetiin myös laskentapohjan selkeyttä.

Kokeeseen valittiin kolme eri rakennesuunnittelijaa, jotka eivät ole ennen mitoittaneet puurakennetta palotilanteessa. Heille annettiin samat lähtötiedot: Palkin materiaali ja mitat, kuormitukset, palonkestovaatimus sekä palonsuojalevyn tyyppi. Lopuksi rakennesuunnittelijoiden piti tulostaa laskelma.

Kaikki kolme rakennesuunnittelijaa saivat palkille samat käyttöasteet, eli mitoitus onnistui. Myös tuloste oli kaikilla samanlainen. Käyttäjien mukaan laskentapohjaa oli selkeä käyttää. Mitoittaminen sujui nopeasti, koska kokeessa lähtötiedot oli listattu valmiiksi. Tavallisesti palomitoituksen lähtötietojen etsimiseen saattaisi kulua hieman enemmän aikaa. Tavallisesti myös palotilanteen rasituksen joutuisi laskemaan itse. Tässä kokeessa se oli laskettu valmiiksi lähtötietoihin, koska kokeen päätarkoitus oli testata laskentapohjan käytettävyyttä, eikä haluttu kuluttaa suunnittelijoiden aikaa rasituksen laskemiseen.

7.5 Laskentapohjan käyttökohteet

Päätarkoitus opinnäytetyön alkuvaiheessa oli, että laskentapohjalla pystytään mitoittamaan suojattu tai suojaamaton puinen palkki tai pilari palotilanteessa. Käytännön esimerkkejä edellä mainituista rakenneosista ovat esimerkiksi kuvassa 2 esiintyvät porrastanteiden palkit ja rappukäytävän pilari. Suomen rakentamismääräyskokoelman mukaan P2-luokan rakennuksen uloskäytävien porrastanteiden tulee säilyä palossa kantavana 30 minuuttia, kun niihin johtavien tilojen palokuorma on alle 600MJ/m^2 ja yli 60 minuuttia, kun palokuorma on suurempi. Tämän takia kuvan 2 palkit ja pilari on mitoitettava palotilanteessa.

Laskentapohjaa voidaan soveltaen käyttää myös esimerkiksi palkin kiepahdustukien mitoittamiseen palotilanteessa. Tämä onnistuu, kun ajatellaan kiepahdustuki pilarina ja lisätään sille puristusrasitus laskentapohjassa. Tämä on tärkeä vaihe, jos laskee palkin kiepahdustuettuna, koska tällöin myös nurjahdustukien on kestävä palossa vaadittu aika. Jos kiepahdustuet eivät kestä palossa niille tulevaa rasitusta, ei palkkia voida mi-

toittaa kiepahdustuettuna. Tässä tapauksessa vaihtoehtona on suurentaa kiepahdustukia niin, että ne kestävät palotilanteessa tai mitoittaa palkki ilman kiepahdustukia.

7.6 Jatkokehitys

Laskentapohjaan voidaan jatkossa tarpeen tullen lisätä materiaalivalikkoon puun eri jatkojalosteita sekä palonsuojamateriaaleihin enemmän vaihtoehtoja. Tällä hetkellä näissä on vaihtoehtoina yleisimmin käytössä olevat materiaalit. Lisäksi käyttäjiltä otetaan vastaan kehitysehdotuksia myös muotoiluun ja käytettävyyteen liittyen.

Laskentapohjaan olisi mahdollista tehdä tulevaisuudessa myös osio, joka laskee suoraan rasitukset palotilanteessa, kun käyttäjä syöttää rakenneosan tiedot, sille tulevat kuormat ja tuentatavan. Lisäksi laskentapohjaa voidaan laajentaa laskemaan suoraan esimerkiksi palkin kiepahdustuentaan tarvittavan voiman ja antamaan vaadittavat dimensiot kiepahdustuille.

Tilaajayrityksellä on käytössään laajempi teräsrakenteiden mitoittamiseen tarkoitettu laskentapohja, johon on tulevaisuudessa tarkoitus lisätä puurakenteen mitoittaminen. Tämän opinnäytetyön laskentapohjaa voidaan tulevaisuudessa käyttää laajemman laskentapohjan kehittämiseen.

8 LASKENTAESIMERKKI

8.1 Lähtötiedot

Laskentaesimerkissä mitoitetaan yksiaukkoinen liimapuupalkki, jonka pituus on 10 metriä ja vaadittu palonkesto aika on 60 minuuttia. Palkki on palolle alttiina kolmelta sivultaan, koska tässä esimerkissä oletetaan, että yläpuolinen rakenne suojaa palkin yläpintaa. Palkin materiaaliksi valitaan GL32c. Omapaino on 5 kN/m ja lumikuormaa on 15 kN/m . Valitaan palkin leveydeksi 215 mm ja korkeudeksi 630 mm . Laskentapohja antaa kuvan 12 mukaisen tehollisen poikkileikkauksen.

Tehollinen poikkileikkaus:

d_{ef}	46,1	mm
b_{fi}	123	mm
h_{fi}	584	mm
A_{fi}	71703	mm ²
$I_{z,fi}$	90105713	mm ⁴
$I_{y,fi}$	2037194742	mm ⁴
$W_{y,fi}$	6977889	mm ³

KUVA 12. Laskentaesimerkin tehollinen poikkileikkaus

8.2 Rasitukset

Lasketaan vertailun vuoksi palkin palotilanteen rasitukset kahdella eri Eurokoodi 5:n sallimalla tavalla. Tarkastellaan tässä esimerkissä vain kuormitusyhdistelmää, jossa lumi on määräävä muuttuva kuorma.

Palotilanteen kuorma tarkemmalla menetelmällä: (RIL 205-2-2009 kaava 2.7.1S)

$$E_{d,fi} = G_k + \sum_{i \geq 1} \Psi_{fi,i} Q_{k,i} = 5 \frac{\text{kN}}{\text{m}} + 0,4 * \frac{15 \text{kN}}{\text{m}} = 11 \text{kN/m} \quad (8)$$

Palkin taivutusmomentti palotilanteessa, kun kuormitus on laskettu tarkemmalla menetelmällä:

$$M_{d,max,fi} = \frac{E_{d,fi} * L^2}{8} = \frac{11kN/m * (10m)^2}{8} = 137,5kNm \quad (9)$$

Palotilanteen kuorma yksinkertaisemmalla menetelmällä: (RIL 205-2-2009 kaava 2.8)

$$E_{d,fi} = \eta_{fi} * E_d = 0,6 * 1,5 * \frac{15kN}{m} + 1,15 * \frac{5kN}{m} = 16,95kN/m \quad (10)$$

Palkin taivutusmomentti palotilanteessa, kun kuormitus on laskettu yksinkertaisemmalla menetelmällä:

$$M_{d,max,fi} = \frac{E_{d,fi} * L^2}{8} = \frac{16,95kN/m * (10m)^2}{8} = 211,875kNm \quad (11)$$

Tarkemmalla menetelmällä laskien palotilanteen taivutusmomentti on siis noin kolmanneksen pienempi, vaikka kuormat ovat samat. Käytetään laskennassa tarkemmalla menetelmällä saatua taivutusmomenttia 137,5 kNm.

8.3 Tulokset

Laskentapohja antaa palkin taivutuskestävyydelle kuvan 13 mukaisen tuloksen.

Taivutuskestävyys:

Momentti	$M_{d,max,fi}$	137500000	Nmm
Taivutusjännitys:	$\sigma_{m,y,d,fi}$	19,71	N/mm ²
Taivutuslujuus	$f_{m,d,fi}$	36,8	N/mm ²
Mitoitusehto:	$\sigma_{m,y,d,fi} \leq f_{m,d,fi}$		
Käyttöaste:	54 %		OK

KUVA 13. Laskentaesimerkin taivutuskestävyys

Kiepahduskestävyyden laskennassa valitaan, että kuormitus sijaitsee palkin puristetun reunan korkeudella ja sitä ei ole kiepahdustuettu. Laskentapohja antaa kiepahduskestävyydelle kuvan 14 mukaisen tuloksen.

Kiepahduskestävyys:

Kuormituksen sijainti	<div>Puristetulla</div>	puolella
Poikittaistuenta	<div>Ei kiepahdustukia</div>	
Tehollinen jänneväli	$l_{ef,fi}$	11167,8 mm
Taivutusjännitys:	$\sigma_{m,y,d,fi}$	19,71 N/mm ²
Kriittinen taivutusjännitys	(Suorakaidepoikkileikkaus)	
	c	0,71
	$\sigma_{m,crit,fi}$	20,96 N/mm ²
Suhteellinen hoikkuus	$\lambda_{rel,m,fi}$	1,33
k_{crit} -kerroin	$k_{crit,fi}$	0,57
Mitoitusehto	$\sigma_{m,y,d,fi} \leq k_{crit,fi} * f_{m,d,fi}$	
Käyttöaste	94 %	
	OK	

Palotilanteessa leikkauskestävyyttä ja puristuskestävyyttä tuella ei tarvitse tarkistaa!

KUVA 14. Laskentaesimerkin kiepahduskestävyys

9 POHDINTA

Laskentapohjaa tehdessä haastavinta oli saada ohjelma mitoittamaan rakenneosan materiaalista ja palosuojauksesta riippuen. Puun eri jatkojalosteille on olemassa eri hiilittymisnopeudet ja hiilittymisnopeuteen vaikuttaa myös käytettävä palosuojaus. Laskentapohja piti saada toimimaan usealla eri vaihtoehdolla, tämä vaati ohjelman käyttöohjeisiin perehtymistä ja kokeneempien Excelin käyttäjien konsultointia. Laskentapohja saatiin kuitenkin toimimaan oikein ja pidettyä sen käyttäminen ja ulkoasu yksinkertaisena.

Laskentapohja soveltuu palosuojatun tai -suojaamattoman palkin ja pilarin mitoittamiseen palotilanteessa. Se tarkastettiin tilaajayrityksessä työskentelevän kokeneemman rakennesuunnittelijan toimesta, jonka jälkeen tehtiin pieniä muutoksia ja todettiin työkalu toimivaksi. Pieniin muutoksiin kuului muun muassa materiaalin ominaisuuksien haku, joka muutettiin toimivaksi Excelin PHAKU -funktion avulla. Tämä helpottaa laskentapohjan tarkastamista ja jatkossa uusien puun jatkojalosteiden lisäämistä rakenneosan materiaaliksi. Laskentapohjan käytettävyys todennettiin pienen kokeen perusteella, jossa kolme puurakenteen palomitoitukseen syvemmin perehtymätöntä rakennesuunnittelijaa mitoitti ja tulosti samojen lähtötietojen perusteella palkin onnistuneesti.

Laskentapohjaa voidaan jatkossa laajentaa palkin tai pilarin materiaalivevaihtoehtoja ja palosuojausvaihtoehtoja lisäämällä. Lisäksi laskentapohjan on tulevaisuudessa tarkoitus toimia osana yrityksen käytössä olevan suuremman mitoitus työkalun laajentamista. Sopivana jatkotutkimusaiheena voisi olla myös laskentapohjan laajentaminen koskemaan liitosten mitoittamista palotilanteessa.

Tutkimusmenetelmänä kirjallisuustutkimus ja asiantuntijahaastattelut antoivat hyvää tietoa ja ohjeita laskentapohjan ja teoriaosuuden tekemiseen. Sen lisäksi että tilaajayrityksen käyttöön saatiin toimiva työkalu, tutkimus lisäsi tietämystäni puurakenteiden mitoittamisesta erityisesti palotilanteessa. Lisäksi tutkimus lisäsi taitojani Excel-ohjelman käyttäjänä ja tietämystäni Eurokoodi 5:stä, Maankäyttö ja rakennuslaista sekä Suomen Rakentamismääräyskokoelmasta.

LÄHTEET

CLT.info uutiset 2015. Tulostettu 3.4.2016.

<http://www.clt.info/fi/uutiset/uutiset/>

Firesafety in timber buildings. Technical guideline for Europe. 2010. Tukholma. SP Technical Research Institute of Sweden. SP Trätek.

Gyproc. 2011. Paloluokitusjärjestelmät. Tulostettu 12.1.2016.

<http://www.gyproc.fi/suunnittelu/palosivusto/maaritelmia/paloluokitusjarjestelmat>

Gyproc. 2011. Standardipalo. Tulostettu 12.1.2016.

<http://www.gyproc.fi/suunnittelu/palosivusto/tulipalot/standardipalo>

Hietaniemi. J. Toiminnallinen palotekninen suunnittelu. VTT. Tulostettu 29.3.2016

<http://www.spek.fi/loader.aspx?id=361342fb-3062-449e-8518-a3c3dca4dc0c>

Kaitila, O. 2008. Ruukki: Rakenteiden toiminnallinen palomitoitus, suunnitteluohje. Helsinki: Teräsrakenneyhdistys ry.

Lepikonmäki L. Osastopäällikkö. 2016. Haastattelu 5.1.2016. Haastattelija Koivisto, J. Tampere.

Maankäyttö- ja rakennuslaki 5.2.1999/132

Paloturvallinen puutalo. 2005. Vammala: Wood Focus Oy.

PUU 3/15. 2015. Helsinki: Puuinfo Oy.

Puuinfo. 2013. Puurakenteen palomitoitus. Tekninen tiedote.

Puuinfo. 2014. TuplaA. Koulutusmateriaali.

Puuinfo. 2015. Puukerrostalon toiminnallinen palotekninen suunnittelu. Tekninen tiedote.

Puuinfo. Mitoitusohjelmat. Tulostettu 3.4.2016

<http://www.puuinfo.fi/mitoitusohjelmat>

Puuinfo. Paloteknisiä ominaisuuksia. Tulostettu 14.1.2016.

<http://www.puuinfo.fi/puutieto/puu-materiaalina/paloteknisi%C3%A4-ominaisuuksia>

Puuinfo. Puurakentamisen asema ja mahdollisuudet Suomessa. Tulostettu 1.2.2016.

<http://www.puuinfo.fi/node/1652>

Puuinfo. Puurakenteiden paloturvallisuus. Tulostettu 17.2.2016.

<http://www.puuinfo.fi/puutieto/puusta-rakentaminen/puurakenteiden-paloturvallisuus>

RIL 205-2-2009 Puurakenteiden suunnitteluohje. 2009. Helsinki: Suomen Rakennusinsinöörien Liitto RIL ry.

SFS-EN 1995-1-2 Eurokoodi 5. Puurakenteiden suunnittelu. Puurakenteiden palomitoitus. Vahvistettu 21.12.2004.

Skol Ry. Eurocode-laskentapohjat. Tulostettu 3.4.2016.

<http://www.skolry.fi/eurocode-laskentapohjat>

Suomen rakentamismääräyskokoelma. E1. Rakennusten paloturvallisuus. Määräykset ja ohjeet 2011. 2011. Helsinki: Ympäristöministeriö. Asunto- ja rakennusosasto.

Woodarchitecture. Puukuokka 1. Tulostettu 1.2.2016.

<http://www.woodarchitecture.fi/fi/projects/oy-puukuokka>